

Aus der Universitäts-Augenklinik Mainz

Direktor: Professor Dr. A. Nover

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR KERATOPLASTIK

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der Medizin
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz,
den Medizinischen Fachbereichen

vorgelegt von

Ernst-Jürgen Schmitt
aus Lauterbach/Hessen

Mainz 1973



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554427_0075

Aus der Universitäts-Augenklinik Mainz

Direktor: Professor Dr. A. Nover

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR KERATOPLASTIK

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der Medizin
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz,
den Medizinischen Fachbereichen

vorgelegt von

Ernst-Jürgen Schmitt
aus Lauterbach/Hessen

Mainz 1973



Fachbereichsdekan: Professor Dr. H. Langendorf

Referent: Professor Dr. A. Nover

Korreferent: Professor Dr. J. Gärtner

<u>Inhaltsverzeichnis :</u>	Seite
I. Einleitung	1
II. Geschichtliches zur Keratoplastik	3
III. Methodik der Untersuchungen	
1. Der spannungsoptische Modellversuch	5
2. Die physikalischen Grundlagen der spannungsoptischen Darstellung	5
3. Das Entstehen der Isoklinen	8
4. Der Aufbau der experimentellen Anordnung	10
5. Das photographische Verfahren	11
IV. Das spannungsoptische Modell	
1. Grundsätzliche Anforderungen an die zu konstruierenden Modelle	15
2. Allgemeine Beschreibung der für die Versuche verwendeten Modelle	18
V. Eigene Untersuchungen	22
VI. Untersuchungsergebnisse	24
1. Modell A	25
2. Modell B	28
3. Modell C	30
4. Modell D	32
5. Modell E	34
VII. Diskussion der Ergebnisse	
1. Die Spannungsverhältnisse in der Wirtskornea	36
2. Die Spannungsverhältnisse in den Transplantaten	38
VIII. Zusammenfassung	42
IX. Literaturverzeichnis	44

I. Einleitung

Verschiedene Faktoren, zum Beispiel immunologische und biomechanische Vorgänge, sind der Grund für gewisse Risiken bei einer Hornhauttransplantation. Trotz verbesserter Operationstechnik ist ihr erfolgreicher Ausgang auch heute noch nicht von vorneherein gesichert.

Für einen Mißerfolg der Transplantation oder für eine postoperative Hornhauttrübung scheinen außer den bekannten immunologischen Faktoren noch andere Ursachen, wie zum Beispiel biomechanische, verantwortlich zu sein.

Es ist nicht zu vermeiden, daß die Nähte, mit denen Transplantat und Wirtskornea verbunden werden, Spannungen und Verzerrungen in beiden Geweben hervorrufen. Die Anordnung der Nähte beeinflußt die Verteilung und Stärke dieser Spannungen wie auch deren Richtung in Transplantat und Wirtskornea.

Das angesprochene Problem bestand in den Anfängen der Hornhautchirurgie nicht, da zunächst keine direkten Nähte gelegt wurden, sondern das Transplantat durch einen Bindehautlappen oder durch quer über das Transplantat verlaufende Fäden in seiner Lage gehalten wurde. Dieses Vorgehen hatte den Vorteil, daß das Transplantat selbst praktisch unangestastet blieb. Der Nachteil dabei war aber, daß sich das Transplantat häufig verlagerte oder gar ganz herausfiel, besonders bei unruhigen Patienten und bei Kindern.

Nach Verbesserung der Operationstechnik und Entwicklung geeigneten Nahtmaterials bevorzugt man deshalb seit Jahren eine direkte Fixation des Transplantates. Schon mehrfach wurde auf biomechanische Faktoren hingewiesen, die bei der direkten Naht eine Rolle spielen :

So verlangt BARRAQUER (1971) das Legen von radiär verlaufenden Fäden und gleichmäßige, symmetrisch über den Schnitttrand verlaufende Nähte, um Verspannungen möglichst zu vermeiden. Desgleichen fordert er eine ausreichende Zahl sich jeweils gegenüberliegender Nähte, damit sich die unvermeidbaren Spannungen wenigstens gleichmäßig über die Wundlinie verteilen und nur einen geringen Astigmatismus bewirken.

In analoger Weise empfiehlt HALLERMANN (1963) die direkte Naht als beste Methode der Transplantatsicherung, während HRUBY (1965) in der direkten Fixation des Transplantates keinen Vorteil sieht. Er weist in diesem Zusammenhang darauf hin, daß bei der direkten Einzelnaht oder bei fortlaufendem Faden die regelmäßige Anlage der Nähte und die Verteilung der Zugkräfte ein schwieriges Problem darstelle.

An der Universitäts-Augenklinik in Mainz hatten 1968 GÄRTNER und 1970 HOCHGESAND und GÄRTNER Untersuchungen durchgeführt, in denen sie mittels spannungsoptischer Methoden die Zugwirkung der Augenmuskeln auf den Bulbus klärten.

Es lag daher nahe, mit dieser Methode auch die bei einer Hornhauttransplantation entstehenden Spannungen zu untersuchen.

Darüber hinaus bemühten wir uns, praktisch verwertbare Aussagen darüber zu erhalten, welche Nahttechnik die geringsten Spannungen in Transplantat und Wirtskornea verursacht und somit unter dem Gesichtspunkt der Biomechanik für die Einheilung eines Transplantates die günstigste ist.

II. Geschichtliches zur Keratoplastik

Als nachweislich Erster äußerte der Franzose PELLIER de QUENGSY 1789 die Idee, eine getrübte Hornhaut durch Stücke transparenten Materials zu ersetzen. Diese Idee wurde jedoch längere Zeit nicht weiterverfolgt, bis HIMLY¹⁾ aus Wien 1813 erneut diesen Gedanken aufgriff und vorschlug, diesbezügliche Experimente an Tieren zu versuchen. Ein erster Versuch erfolgte 1824 durch seinen Schüler REISINGER an einem Kaninchen. Angeregt von REISINGERS Arbeiten versuchten sich an diesem Problem in der Folgezeit noch mehrere Chirurgen. Alle Versuche, einschließlich REISINGERS eigenen, scheiterten daran, daß es bald nach der Operation zu einer Trübung des Transplantates kam. Nach vielen Fehlschlägen im Tierversuch erklärte DIEFFENBACH 1831 die Idee einer Hornhauttransplantation für undurchführbar. Daraufhin ließ der Forscherdrang auf diesem Gebiet nach, bis der Amerikaner KISSEM²⁾ in New-York Versuche mit Heterotransplantationen vom Schwein auf den Menschen durchführte und unter ihm schließlich auch die erste Homotransplantation von Mensch zu Mensch im Jahre 1844 fehlschlug. In London schließt POWER nach langen Tierversuchen darauf, daß, wenn überhaupt, nur die Homotransplantation von Mensch zu Mensch sinnvoll und erfolgversprechend sei.

Parallel zu den verschiedenen Versuchen liefen auch Bemühungen, ein geeignetes Instrumentarium für eine technisch einwandfreie Transplantation zu entwickeln, da man erkannt hatte, daß gerade auch die Methoden der Entnahme des Transplantates und seiner darauf folgenden Fixation in der Wirtskornea mittels speziell konstruierter Instrumente mit ausschlaggebend für den Erfolg sind. So kamen zum Beispiel doppelt schneidende Messer und speziell für die Entnahme des Transplantates konstruierte Trepane 1877 erstmalig durch v. HIPPEL in Wien zur Anwendung.

1) 2) zit. nach CASTROVIEJO, R. : Atlas of Keratectomy and Keratoplasty, W. B. Saunders Company, Philadelphia-London, 1966

In weiterer chronologischer Reihenfolge beschäftigten sich mit dem Problem der Hornhautübertragung ZIRM, dem 1905 die erste lamelläre Transplantation gelang, LÖHLEIN (1910), MAGITOT (1911), FRIEDE (1935), FILATOW (1935), um nur einige zu nennen. Alle Genannten bevorzugten die lamelläre Transplantation, bei der nicht die Hornhaut in ganzer Dicke, sondern nur eine Schicht aus einer Spenderkornea entnommen wird. Vom Empfängerauge, an dem die pathologischen Veränderungen nur in den oberflächlichen Schichten vorhanden sind, wird ebenfalls nur dieser Teil der Hornhaut abgetragen und durch das Transplantat ersetzt. Darüber hinaus prüften aber ELSCHNIG und FILATOW auch die Möglichkeiten einer penetrierenden Keratoplastik.

Da weiterhin die Schwierigkeiten bei der Keratoplastik die Erfolge überwogen und diese Operation schließlich auch als von nur geringem praktischen Interesse angesehen wurde, arbeiteten in der Folgezeit nur wenige auf diesem Gebiet weiter, darunter THOMAS in Großbritannien, CASTROVIEJO in den USA und FRANCESCHETTI in der Schweiz. Dennoch wurde diese Operation durch die Verbesserung des Instrumentariums, dem Aufkommen der Antibiotika- und Corticoidbehandlung und dadurch, daß man die immunologischen Probleme besser in den Griff bekam, in den letzten zwanzig Jahren fast zu einer Routineoperation. Einige Fragen blieben dennoch bis heute ungeklärt, darunter das Entstehen der postoperativen Trübung der Kornea und das Auftreten einer störenden Vaskularisation.

III. Methodik der Untersuchungen

1. Der spannungsoptische Modellversuch :

Besonders geeignet für den Zweck unserer Untersuchungen schien der spannungsoptische Modellversuch zu sein :

Diese Methode, deren Einzelheiten im folgenden beschrieben werden, gelangt bei allen Fragestellungen in Technik und Biomechanik zur Anwendung, bei denen es gilt, Spannungen in einem durch Zug und Druck beanspruchten Material sichtbar zu machen. Erstmalig in der Medizin wurde diese Methode 1948 durch den Orthopäden PAUWELS angewendet, um experimentell Aufbau und Struktur von Knochen und Stützgeweben zu klären. Ein besonders anschauliches Beispiel bietet der Oberschenkelhals. Er läßt, im Aufschnitt betrachtet, einen bestimmten Verlauf der Spongiosabälkchen erkennen, der für die Art der Belastung des Oberschenkelhalses eine adäquate, optimale Anordnung darstellt. Im spannungsoptischen Modellversuch entsprach die Struktur dieser Bälkchen genau den Spannungslinien.

Es wird also mit dieser Methode das Verhalten durchsichtiger, elastischer und isotroper Körper bei Beanspruchung durch Druck oder Zug sichtbar gemacht. Diese experimentell-gewonnenen Befunde lassen Analogschlüsse auf das tatsächliche Verhalten von Körpergeweben zu.

2. Die physikalischen Grundlagen der spannungsoptischen Darstellung :

Die physikalischen Grundlagen des spannungsoptischen Versuches sind von denjenigen Autoren ausführlich beschrieben und diskutiert worden, die diese Methode angewendet haben (PAUWELS, KUMMER, SCHLÜTER), so daß sich hier eine ausführliche Beschreibung dieser Grundlagen erübrigt. Es soll nur soweit auf einige Einzelheiten eingegangen werden, wie es für das Verständnis der folgenden Versuche notwendig ist.

Die spannungsoptische Apparatur besteht immer aus einer Lichtquelle, dem Polarisator und dem Analysator. Zwischen Polarisator und Analysator steht das Modell mit der Belastungseinrichtung. Die Lichtquelle besteht aus einem Lichtkasten, dessen Licht durch eine Milchglasscheibe nach außen fällt (Abb. 1).

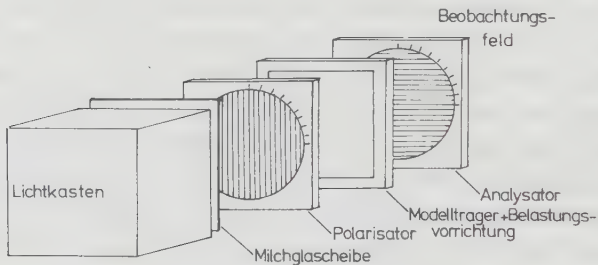


Abb. 1 : Aufbau einer spannungsoptischen Apparatur

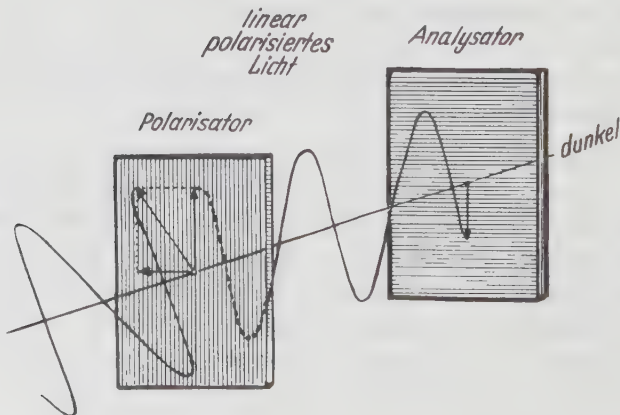


Abb. 2 : Funktion der Polarisationsfilter
(modifiziert nach SCHLÜTER)

Wie Abbildung 2 zeigt, läßt der Polarisator das Licht nur in einer, hier der senkrechten Ebene, durchtreten. Der Analysator steht in der Abbildung im rechten Winkel zum Polarisator und somit zur Schwingungsebene des zuvor linear polarisierten Lichtes. Das Feld hinter dem Analysator bleibt dunkel.

Bringt man bei dieser Stellung von Analysator und Polarisator zwischen beide ein durchsichtiges, isotropes Material, zum Beispiel einen Plexiglaskörper, so verändert dieser nichts am Strahlengang des polarisierten Lichtes. Erst bei mechanischer Belastung des Modells verliert der ehemals isotrope Körper diese Eigenschaft, er wird anisotrop und somit doppelbrechend wie ein Kristall.

Den Schwingungsvektor des auf das Modell fallenden linear polarisierten Lichtes kann man nach den Hauptspannungsrichtungen in zwei Komponenten zerlegen. Beide Komponenten pflanzen sich im Modell mit unterschiedlicher Geschwindigkeit fort, so daß beide nach Austritt aus dem Modell einen Gangunterschied aufweisen. Setzt man beide zu einer Resultierenden zusammen, so ergibt sich nicht mehr linear, sondern elliptisch polarisiertes Licht, in dem natürlich auch waagrechte Komponenten vorkommen. Das Betrachtungsfeld hinter dem Analysator ist dann in verschiedenem Grade aufgeheilt, je nach dem Gangunterschied beider Komponenten.

Es ist schon erwähnt worden, daß die Richtungen von Spannungen im Modell nachgewiesen werden sollen. Es geht nicht darum, die Stärke einer Belastung zu ermitteln. Diese ist für die Fragestellung dieser Arbeit ohne Interesse, da auch die Belastungsgröße in keinem berechenbaren Verhältnis zu der wahren Beanspruchung am menschlichen Auge steht. Die Belastungsgröße spielt nur insofern für den Versuch eine Rolle, als das sich ergebende Bild umso deutlicher die den Spannungsverlauf charakterisierenden sog. Isoklinen ergibt, je stärker die in das Modell eingebrachte Belastung ist.

Isoklinen, deren Entstehung im folgenden Kapitel noch beschrieben wird, sind gedachte Linien, die Orte gleicher Spannung verbinden. Die Belastungsgröße hat keinen Einfluß auf die Richtung der Spannungen. Eine Änderung der Belastungsgröße ändert nicht den Verlauf der Spannungsrichtungen.

3. Das Entstehen der Isoklinen :

Wie bereits oben ausgeführt, verändert sich bei Belastung eines durchsichtigen isotropen Modells dessen spannungsoptischer Charakter, es wird doppelbrechend und polarisiert das aus dem Modell austretende Licht elliptisch. Das Feld hinter dem Analysator wird stellenweise aufgehellt. Dazwischen verbleiben der Belastungsrichtung entsprechend charakteristisch verlaufende dunkle Felder, die sogenannten Isoklinen. Diese Isoklinen verdanken ihre Entstehung einem Sonderfall des spannungsoptischen Effektes.

Die Intensität des durchgelassenen Lichtes berechnet sich an jedem Punkt des Modelles nach der Formel :

$$I = I_0 \sin^2 2 \beta \sin^2 m\pi, \text{ worin}$$

I = Intensität des durchgelassenen Lichtes

I_0 = Intensität des auffallenden Lichtes

β = Winkel zwischen Polarisationsebene und der nächstgelegenen Hauptspannungsrichtung

m = Gangunterschied der beiden Schwingungskomponenten des Lichtes in den beiden Hauptspannungsrichtungen ist.

Immer dann, wenn der Winkel β zwischen der Polarisations-ebene und der nächstgelegenen Hauptspannungsrichtung in der obigen Gleichung gleich Null wird, ist auch die Lichtintensität $I = 0$. Die Linie $\beta = 0$ verbindet also alle Punkte, an denen die Polarisationsrichtung mit den Hauptspannungs-

richtungen übereinstimmt, oder, anders gesagt, alle, da $I = 0$, im Feld hinter dem Analysator dunkel erscheinenden Punkte bilden in ihrer Gesamtheit eine Linie, die, da Polarisationsrichtung gleich Hauptspannungsrichtung ist, die Richtung und den Verlauf einer Spannung zeigt (Abb. 3).

An diesen oben erwähnten Punkten herrscht also Dunkelheit, unabhängig von "m". Die Orte, an denen die Hauptspannungsrichtungen gleiche Neigung, d. h. den gleichen Winkel $\beta = 0$ zur Polarisations Ebenen haben und im Feld hinter dem Analysator dunkel bleiben, heißen Isoklinen.

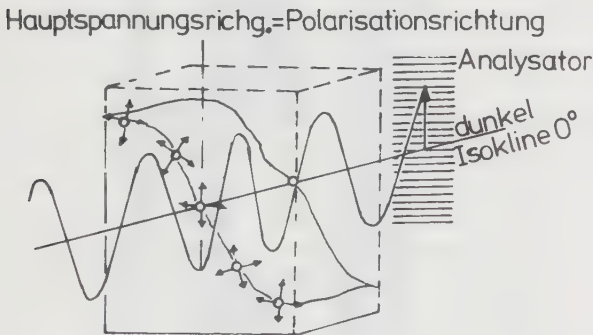


Abb. 3 : modifiziert nach SCHLÜTER

Dreht man die Polarisationsfilter beide zugleich im gleichen Winkel, oder, was denselben Effekt ergibt, dreht man das Modell zwischen den Filtern, so ist eine Verschiebung der Isoklinen im Modell zu beobachten.

Aus dem Verlauf der Isoklinen wird nun das Netz der Hauptspannungstrajektorien dargestellt. Man kann dies zeichnerisch oder auf photographischem Wege tun. Da die Zeichenmethode nicht frei von subjektiver Deutung ist,

wurde von uns das von KUMMER 1956 entwickelte und veröffentlichte photographische Verfahren in abgewandelter Form angewendet.

4. Der Aufbau der experimentellen Anordnung :

Zunächst wird der Aufbau der Versuchsanordnung besprochen. Die einzelnen Bestandteile der Apparatur, wie z. B. Filter, Lichtquelle etc. können entweder auf einer optischen Bank hintereinander, oder, wie in der Abb. 4 gezeigt, übereinander angeordnet werden.

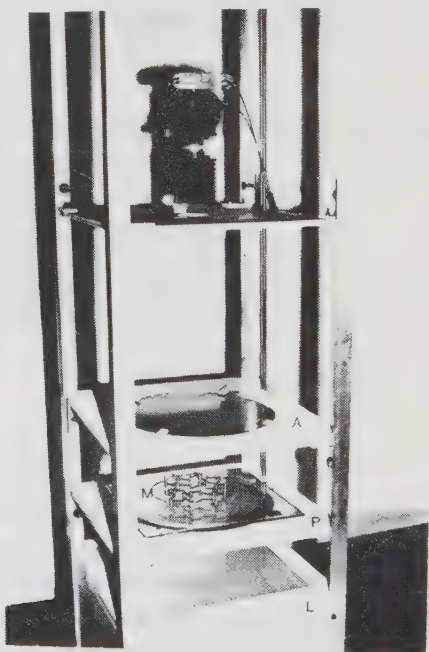


Abb. 4 : Die in unseren Versuchen verwendete spannungsoptische Apparatur

L = Lichtkasten, P = Polarisator

M = Modell, A = Analysator

Da zunächst Versuche an Gelatinemodellen durchgeführt wurden, war diese senkrechte Anordnung, in der das weiche Gelatinemodell horizontal zu liegen kam, am geeignetesten.

Die Apparatur besteht aus dem Lichtkasten "L" mit einer 200-Watt-Glühlampe als Lichtquelle. Der Lichtaustritt erfolgt durch einen aufgesetzten Diffusor. Darüber liegt in einer Holzplatte drehbar eingelassen der kreisrunde erste Polarisationsfilter "P". Die hölzernen Rahmen von Polarisator "P" und Analysator "A" sind mit einer Gradeinteilung von 0° bis 90° versehen. Auf dem Filter "P" ist ein Raster aus einfachem "Gardisette" - Gardinenstoff mit einer Maschenweite von ca. 1 mm aufgeklebt. Über dem Polarisator ist ein schmaler Holzrahmen mit einer eingelegten Glasplatte angebracht, die als Träger für das daraufzulegende Modell "M" fungiert. Der Analysator liegt ebenfalls drehbar in einem Holzrahmen. Analysator und Polarisator besitzen eine Markierung, die dem Verlauf ihrer Polarisationssebene entspricht. Den oberen Abschluß der Apparatur bildet eine Holzplatte, die in der Mitte mit einem größeren Loch und einem Aluminium-Winkel versehen ist. An dem Winkel wird eine Spiegelreflexkamera montiert, die durch das erwähnte Loch in der Holzplatte ihre Bilder aufnimmt.

Alle einzelnen Etagen des Gestelles lassen sich in ihrer Höhe in den vier sichtbaren Aluminium-Winkelschienen verschieben und in jeder gewünschten Stellung fixieren.

5. Das photographische Verfahren :

Je nach der Drehung der beiden Polarisationsfilter ergeben sich aus dem belasteten Modell unendlich viele Isoklinenbilder. Um den charakteristischen Verlauf der Spannungen zu verfolgen, genügen nach KUMMER Drehungen der Filter in Abständen von 10° um ihren Mittelpunkt. Es erfolgen also

neun Drehungen um jeweils 10° . Eine letzte Drehung von 80° auf 90° ist überflüssig, da die 0° -Isokline mit der 90° -Isoklinen identisch ist. Es wird jeweils bei jeder Stellung der Filter von 0° bis 80° eine photographische Aufnahme gemacht. Ein Beispiel für die neun sich ergebenden Isoklinenbilder zeigt die Abbildung 5, auf die an späterer Stelle noch ausführlich eingegangen werden wird.

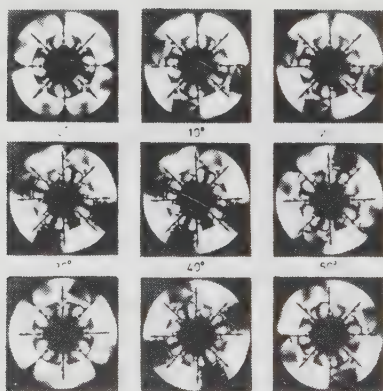


Abb. 5. Beispiel von neun sich ergebenden Isoklinenbildern

Deutlich sind hier in jedem einzelnen Bild die dunklen Stellen, die Isoklinen, zu erkennen, die sich von Bild zu Bild entsprechend der Drehung der Filter ein Stück weiter verschieben. Betrachtet man ein Bild sorgfältig aus der Nähe, so ist selbst bei diesen kleinformatigen Bildern das Raster zu erkennen, das natürlich nur an den erhellten Stellen des Modells durchscheint. Es ist selbstverständlich, daß alle neun Bilder mit dem gleichen Film

und der gleichen Kameraeinstellung aufgenommen wurden.

Die so gewonnenen Negative werden eines nach dem anderen, ebenfalls unter Beachtung gleicher Belichtungszeit und Blende, auf ein und dasselbe Photopapier übereinander kopiert. Dabei ist sorgfältig darauf zu achten, daß jede weitere Projektion auf dem bereits zuvor mit dem ersten Negativ belichteten Photopapier genau über die zuvor erfolgten Projektionen zu liegen kommt. Eine bereits mitphotographierte und beim Kopieren auf dem Photopapier angebrachte Markierung erleichtert diese Millimeterarbeit wesentlich, indem man einfach die Markierung auf dem Negativ und die Markierung auf dem Photopapier zur Deckung bringt.

Die Abbildung 6 zeigt das aus neun Isoklinenbildern resultierende Bild. Definitionsgemäß sind Trajektorien solche Linien, die jede Kurve einer ebenen Kurvenschar im gleichen bleibenden Winkel schneiden. Daher bezeichnen wir ein solches Bild als Trajektorienphotogramm. Die auf diesem Bild sichtbar werdenden radiär verlaufenden Linien schneiden die zirkulären immer im gleichen Winkel.

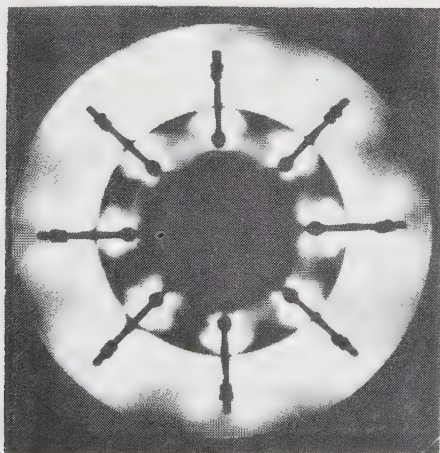


Abb. 6 : Beispiel eines Trajektorienphotogramms

Man erkennt in der Abbildung deutlich die durch das Raster an den erhellten Stellen des Modelles gezeichneten Trajektorien, die identisch sind mit dem Verlauf der in das Modell eingebrachten Spannungen. Wie zu ersehen ist, verlaufen viele Trajektorienlinien parallel zueinander, andere parallele Kurvenscharen schneiden die ersteren in genau rechtem Winkel. Die eine Kurvenschar entspricht den Zug-, die andere den Druckspannungstrajektorien. Wird, wie bei unserem Modell in der Abbildung 6, ein Zug angebracht, so sind diejenigen Trajektorien die Zugspannungstrajektorien, die an der Stelle der Zugeinleitung senkrecht zum Modellrand stehen. Die Druckspannungstrajektorien verlaufen rechtwinklig zu ersteren.

Um die etwas verwirrende Vielfalt der Trajektorien im Photo übersichtlicher werden zu lassen, und um bestimmte Spannungsverläufe gesondert herauszugreifen, legt man über das Bild ein transparentes Zeichenpapier und zeichnet die interessierenden Trajektorien nach. Die Abbildung 7 zeigt neben ihrem zugehörigen Trajektorienphotogramm eine in solcher Weise durchgepauste Zeichnung.

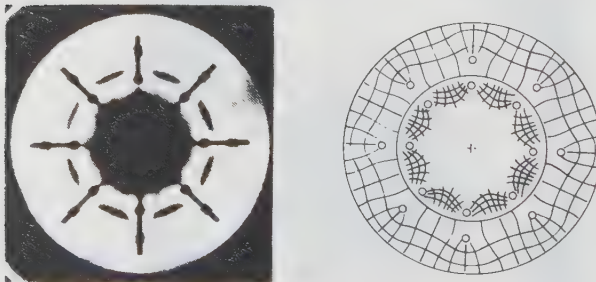


Abb. 7 : Beispiel einer graphischen Darstellung eines Trajektorienphotogramms

IV. Das spannungsoptische Modell

1. Grundsätzliche Anforderungen an die zu konstruierenden Modelle :

Das zu untersuchende Modell mußte aus einem Material hergestellt werden, das bei einer Verformung durch eine eingebrachte Belastung die oben angesprochenen und verlangten spannungsoptischen Eigenschaften besaß.

Mit folgenden Materialien haben wir Versuche unternommen :

- a) mit Gelatine
- b) mit Plastikfolien
- c) mit Plexiglas.

zu a) Gelatine :

Im Handel erhältliche Gelatineplatten wurden mit Wasser aufgekocht, die Gelatinemasse in eine geschliffene Petrischale von 10 cm Durchmesser ausgegossen und abgekühlt.

Mit einem kreisrunden, an den Rändern angeschärften Blechring von 7 cm Durchmesser wurde aus dem Zentrum der erkalteten Gelatine eine Scheibe ausgestanzt. Die gestanzte Scheibe verblieb gleich an Ort und Stelle. Sie stellte das "Transplantat", der verbliebene Gelatinering die "Wirtskornea" dar. Sodann wurde versucht, die beiden Teile an ihrer Schnittstelle mit atraumatischem Nahtmaterial wieder dergestalt zu vernähen, daß in die ca. 1 cm dicke Gelatinescheibe des Transplantates zu zwei Dritteln ihrer Tiefe eingestochen wurde, die Naht U-förmig, wie bei einer echten Naht, waagrecht in die Wirtskornea geführt und aus ihr wieder senkrecht nach oben und außen geführt wurde. Die beiden Enden der Naht wurden mit leichtem Zug verknüpft (Abb. 8). Es wurde versucht, vier und acht Einzelknüpfnähte zu legen.

Schon bei den ersten Versuchen zeigte es sich, daß, allerdings nur unter dem spannungsoptischen Aspekt, die Verwendung der Gelatine günstig erschien, da bereits die geringste Belastung deutlich Isoklinen erscheinen ließ.

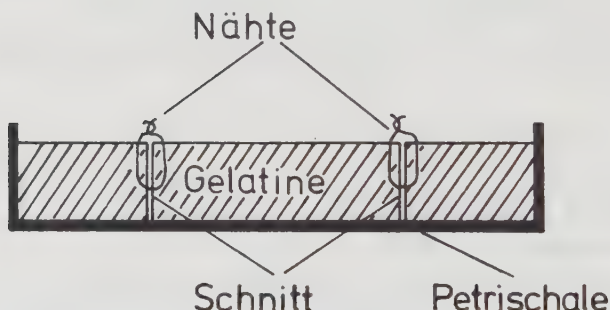


Abb. 8 : Schnitt und Anlegen der Naht beim Versuch mit dem Gelatinemodell

Was die technische Seite dieses Gelatinemodelles anging, erwies es sich aber als unbrauchbar. Selbst hochkonzentriert angesetzte und somit in kaltem Zustand sehr steife und feste Gelatine ließ bei fast jeder noch so behutsam gelegten Naht die Fäden tief in die Gelatine einschneiden; wie eine Bandsäge schnitt der Faden durch das Material, bis er meistens ganz ausriß. Daran änderten auch Versuche mit sehr geschmeidigem Nahtmaterial nichts. Hinzu kam noch, daß, soweit das Modell nicht im Kühlschrank aufbewahrt wurde, bei Zimmertemperatur die Gelatineplatte innerhalb weniger Tage mit Pilzen besiedelt war, so daß es unbrauchbar wurde. Die Versuche mit Gelatine wurden daher aufgegeben.

zu b) Plastikfolien :

Um ein festeres Material zur Hand zu haben als Gelatine, das trotzdem ähnlich spannungsoptisch aktiv ist, wurden Versuche mit Plastikfolien verschiedener Art unternommen. Der Fa. KALLE, Wiesbaden-Biebrich, danken wir für die Überlassung entsprechender Folien.

Ein Stück Folie wurde spannungsfrei über einen runden Spannrahmen gezogen und befestigt. Es wurde wiederum ein kreisrundes Stück ausgeschnitten und wie bei dem Gelatineversuch wieder an seinem Platz durch einzeln geknüpfte und fortlaufende Nähte fixiert.

Auch die Versuche mit Plastikfolien führten leider bald zu technisch unüberwindlichen Schwierigkeiten :

1. Die Folien wiesen alle eine bereits in sich fixierte Vorspannung in einer bestimmten Richtung auf, was auf den Mechanismus der Herstellung und Aufwicklung der Folien zurückzuführen war. Sie waren somit optisch nicht völlig einwandfrei.
2. Folien mit großer Elastizität waren nur Bruchteile von Millimetern stark, so daß im Prinzip das Gleiche wie beim Versuch mit der Gelatine auftrat. Auch dicke Fäden schnitten schon bei geringem Zug in die Umgebung der Einstichstelle ein und rissen teilweise ganz aus. Dickere Folien mit Stärken von einem Millimeter und mehr ließen zwar auch bei kräftigem Zug den Faden nicht einschneiden, waren jedoch, bedingt durch ihre Dicke, so wenig elastisch und geradezu spröde, daß auch bei starkem Zug kaum Isoklinen auftraten. Versuche, diese dicken Folien durch Erwärmen auf Temperaturen zwischen 30° und 80° Celsius elastischer zu machen, schlugen ebenfalls fehl, da die Folien unter der Wärmeeinwirkung ihre optischen Eigenschaften änderten. Deshalb mußten auch die Versuche mit den Plastikfolien aufgegeben werden.

zu c) Plexiglas :

Als drittes Material kam Plexiglas in Betracht. Der Fa. RÖHM & HAAS, Darmstadt, danken wir für die Überlassung entsprechenden Plexiglasses. Es wurde ein Modell konstruiert, das allen Anforderungen des Versuches weitgehend entsprach. Eines dieser Modelle zeigt die Abbildung 9.

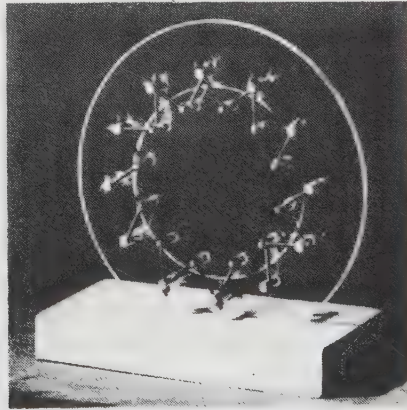


Abb. 9 : Plexiglasmodell einer Keratoplastik mit fortlaufend gleichschenkliger Naht

2. Allgemeine Beschreibung der für die Versuche verwendeten Modelle :

Aus Plexiglas in einer Stärke von 0,5 cm wurde eine Scheibe von 20 cm Außen- und 12 cm Innendurchmesser gefertigt, die die "Wirtskornea" darstellt; desgleichen eine runde Scheibe von 11,8 cm Durchmesser, die dem "Transplantat" entspricht. Die zu legenden Nähte wurden durch eine Hilfskonstruktion ersetzt, die aber in ihrer Funktion genau der einer Naht entspricht (Abb. 10). Durch Bohrungen in Ring und Scheibe wurden gleichlange und ihrer zugeordneten

Funktion entsprechend bearbeitete Silberstahlbolzen gesteckt, die auf beiden Seiten des Modelles mit Gewindestäben verbunden sind. Durch Anziehen der Muttern läßt sich nun ein recht genau dosierbarer Zug auf das Modell an den Einstichstellen ausüben.

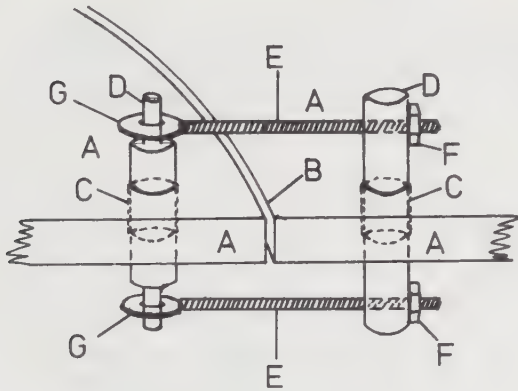


Abb. 10 : Die im Text erwähnte Hilfskonstruktion, durch die die Nähte dargestellt sind

- A = Plexiglasring- und Scheibe,
- B = Schnitttrand,
- C = Bohrungen im Plexiglas,
- D = Stahlbolzen,
- E = Gewindestäbe,
- F = Gewindemuttern

Nach diesem Prinzip wurden fünf Modelle gebaut, die sich jeweils einmal durch den Abstand der Bohrungen vom Schnitttrand und durch die Art und Weise der Nahtführung unterscheiden.

Die Abbildung 11 a - e zeigt schematisch die Unterschiede der fünf Modelle :

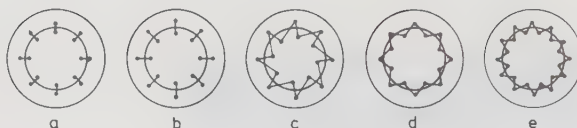


Abb. 11 a - e : Die Nahtmethoden, die in den Versuchen zur Anwendung kamen

11 a : zeigt das Modell mit acht Einzelknüpfnähten, Abstand der Bohrungen zum Schnitt 1 cm.

11 b : zeigt das gleiche Modell, nur beträgt hier der Abstand von Einstich zu Schnitttrand 1,5 cm.

11 c : zeigt ein Modell mit acht Einstichen, aber ungleichschenklig fortlaufender Naht.

11 d : zeigt ein Modell mit acht Einstichen und gleichschenklig fortlaufender Naht.

11 e : Modell mit zwölf Einstichen und gleichschenklig fortlaufender Naht.

Diese fünf Modelle wurden nun nach der in Kapitel III., 5. beschriebenen Methode belastet und untersucht.

V. Eigene Untersuchungen

Gang der Untersuchung mit den Plastikmodellen :

Die Schrauben und damit die "Nähte" des Modelles wurden in der Weise angezogen, daß alle Nähte gleich stark angespannt waren. Dies geschah einmal auf die Weise, daß die jeweils gegenüber- und übereinanderliegenden Muttern gleichviel Umdrehungen weit angezogen wurden. Zugleich wurde das Anbringen der an allen Nähten gleichen Belastung ständig zwischen den beiden Filtern an Hand der Größe der sofort sich zeigenden Isoklinen überprüft. Zudem mußte darauf geachtet werden, daß Transplantat und Wirtskornea sich an keiner Stelle mit ihren Schnittflächen berührten. Nachdem die gewünschte Belastung an dem Modell eingestellt war, wurde es in genau zentrierter Position zwischen die beiden Polarisationsfilter gebracht.

Auf der obersten Plattform des Gestelles wurde an dem dafür vorgesehenen Winkel die Kamera mit vorgeschaltetem Balgengerät für Nahaufnahmen montiert. In die Leica-Spiegelreflexkamera war ein Agfa-Kleinbildfilm, schwarz-weiß, 15-DIN, eingelegt. Am Objektiv wurde die Scharfeinstellung vorgenommen, wobei das auf den Polarisator aufgeklebte Raster scharf eingestellt wurde. Eine Scharfeinstellung auf das Modell konnte der so und so unscharf begrenzten Isoklinen wegen vernachlässigt werden.

Die beiden Filter wurden durch Drehung in ihren Lagern in einem Winkel von 90° zueinander eingestellt, so daß das Feld hinter beiden Filtern dunkel war. Die Lage des Modells zwischen beiden Filtern war unerheblich, einmal festgelegt, mußte sie jedoch über die Dauer des ganzen Versuches hinweg exakt beibehalten werden.

Durch Probieren wurde die beste Blenden- und Belichtungseinstellung ermittelt. Die brauchbarsten Aufnahmen entstanden bei Blende 8 und einer Belichtungszeit von 15 Sekunden pro Einzelaufnahme.

Der Raum wurde abgedunkelt und die Aufnahme der 0° -Isoklinen gemacht. Sodann wurden beide Filter in gleicher Richtung um 10° weitergedreht; es erfolgte die Aufnahme der 10° -Isoklinen und so fort bis zur 80° -Isoklinen, der insgesamt neunten Aufnahme dieser Reihe.

Der auf übliche Weise entwickelte Film zeigte nun die Negative der neun Isoklinenbilder.

Bei der Herstellung des Positiv-Bildes wurde folgendermaßen verfahren :

Wiederum durch Probieren wurden die günstigste Blenden- und Belichtungseinstellung am Kopiergerät festgestellt. Sodann wurden nacheinander, beginnend mit der 0° -Isoklinen, die neun Negativbilder auf ein und dasselbe Photopapier abgelichtet. Wie schon erwähnt, mußte, nachdem das erste Negativ belichtet worden war, sehr darauf geachtet werden, daß alle weiteren Projektionen exakt mit der ersten übereinstimmten und zur Deckung gebracht wurden. Die genaue Justierung des jeweils folgenden Negativ-Bildes auf das vorausgegangene erfolgte unter Rotlichtbeleuchtung mittels kleiner auf Film und Photopapier angebrachter Markierungen.

Das aus den neun Negativbildern resultierende Bild ergibt nun ohne weitere Bearbeitung das sog. Trajektorienphotogramm, wie es schon in Abbildung 6 gezeigt wurde.

Die fünf Modelle wurden in der gleichen Reihenfolge nacheinander untersucht, wie sie in der Abbildung 11 a - e gezeigt sind.

VI. Untersuchungsergebnisse

Im folgenden sollen die Ergebnisse der Untersuchungen der fünf Modelle festgehalten werden.

Entsprechend der Reihenfolge der Modelle in der Abbildung 11 werden sie mit Modell A bis E bezeichnet.

Zu jedem Modell werden zur Veranschaulichung der Untersuchungsergebnisse vier Bilder gezeigt. Erstens eine Abbildung des Trajektorienphotogrammes; zweitens eine vereinfachende graphische Darstellung des Trajektorienphotogrammes; drittens ein vergrößerter Ausschnitt aus dem Trajektorienphotogramm und viertens eine graphische Darstellung dieses vergrößerten Ausschnitts.

Bei der nun folgenden Erläuterung der Ergebnisse betrachtet man am besten immer in vergleichender Weise die vier Abbildungen.

1.) Modell A : (Abb. 12 a - d)

In diesem Modell sind die Spannungsverhältnisse nach acht Einzelknüpfnähten und einem Abstand der Einstichstellen zum Schnitttrand von 1 cm dargestellt.

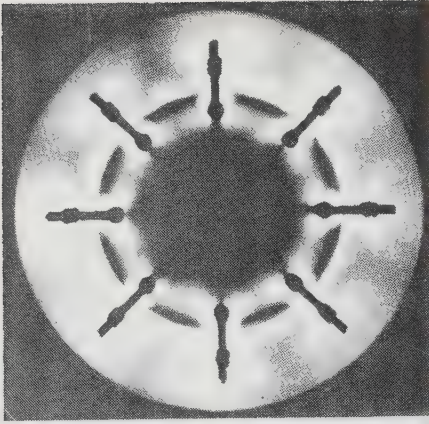
a) Spannungsverhältnisse in der Wirtskornea :

Auf den ersten Blick fällt auf, daß die der Wirtskornea entsprechende Randzone wesentlich mehr aufgehellte ist als die dem Transplantat entsprechende Mitte.

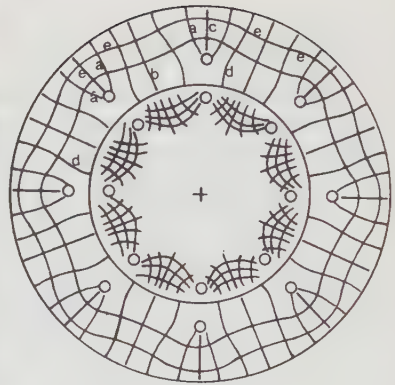
Von den Einstichstellen verlaufen Zugspannungstrajektorien bogenförmig zum Modellrand (in Abb. 12 b, d mit "a" bezeichnet). Sehr deutlich zeigt dies auch die Ausschnittvergrößerung in Abbildung 12 c. Lediglich in der Mitte zwischen zwei Einstichstellen verlaufen die Trajektorien geradlinig auf den Mittelpunkt des Modelles hin ("b" in Abb. 12 b, d). Da der Zug von den Einstichstellen in der Wirtskornea über den zugehörigen Einstich im Transplantat in Richtung Modellmitte geht, zeigen auch die Zugspannungstrajektorien, die genau hinter den Einstichen in der Wirtskornea liegen, geradlinig zur Modellmitte ("c" in Abb. 12 b, d).

Die Trajektorien "d" in Abbildung 12 b, d sind in etwa in ihrem Verlauf eine Resultierende aus den Linien "a" und "b".

Wie in einem vorhergehenden Kapitel beschrieben, schneiden die Druckspannungstrajektorien die Zugspannungstrajektorien in einem rechten Winkel, wie dies in allen vier Aufnahmen zu erkennen ist. Die Druckspannungslinien ("e" in Abb. 12 b, d) verlaufen wellenförmig-zirkulär rund um die ganze Wirtskornea.



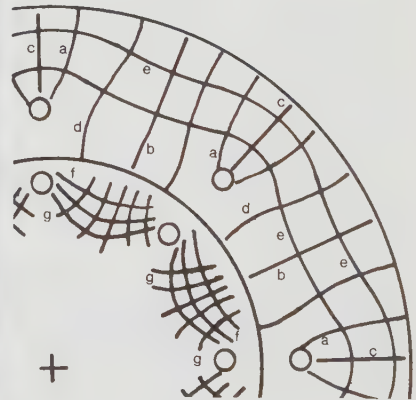
a



b



c



d

Abb. 12 : Modell A mit 8 Einzelknüpfnähten;
Abstand 1 cm

- a) Trajektorienphotogramm
- b) graphische Darstellung
- c) Ausschnitt aus Trajektorienphotogramm
- d) graphische Darstellung

b) Spannungsverhältnisse im Transplantat :

Das Transplantat ist im Gegensatz zur Wirtskornea zum größten Teil dunkel.

Die Zugspannungen verlaufen bogenförmig von Einstichstelle zu Einstichstelle ("f" in Abb. 12 d); die Druckspannungen wiederum dazu senkrecht vom Transplantatrand ausgehend bogenförmig in Richtung Einstichstelle und mit einer zum Zentrum hin sich öffnenden Unterbrechung um die Einstichstelle herum ("g" in Abb. 12 d).

Zwischen den bogenförmig von Einstich zu Einstich verlaufenden Zugspannungen und dem Schnitttrand des Transplantates verbleiben sichelförmige dunkle Felder.

2.) Modell B : (Abb. 13 a - d)

Das zweite untersuchte Modell weist wie das erste acht Einzelknüpfnähte auf, jedoch wurde der Abstand von Einstich zu Schnitttrand auf 1,5 cm vergrößert.

a) Spannungsverhältnisse in der Wirtskornea :

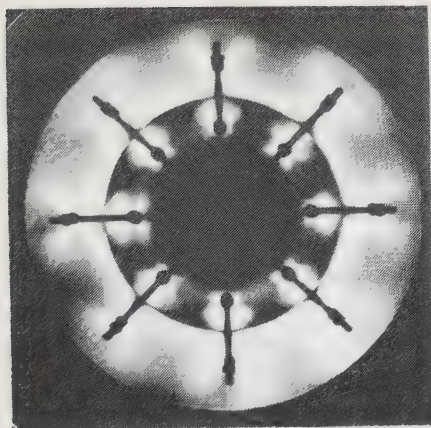
Im wesentlichen zeigt der Spannungsverlauf in der Wirtskornea das gleiche Bild wie bei Modell A; die Zugspannungen verlaufen radiär, die Druckspannungen wellenförmig zirkulär.

b) Spannungsverhältnisse in dem Transplantat :

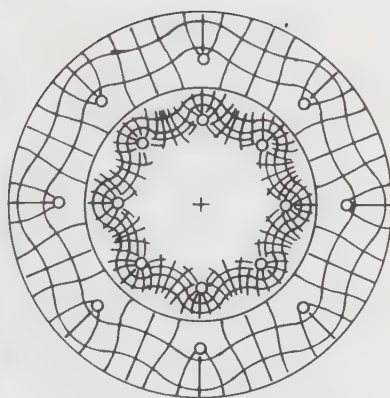
Der Spannungsverlauf in dem Transplantat zeigt ein anderes Bild. Man erkennt auf allen vier Bildern, besonders deutlich in den graphischen Darstellungen, daß Spannungslinien auch hinter den Einstichen, also zwischen Einstichstelle und Transplantatrand verlaufen. Diese um jede Einstichstelle wellenförmig herumlaufenden Spannungslinien sind Zugspannungen.

Druckspannungen verlaufen dazu senkrecht vom Transplantatrand konzentrisch auf die Einstichstelle hin. Zwischen den Einstichen laufen Bündel von Druckspannungslinien, die sich zum Zentrum hin öffnen.

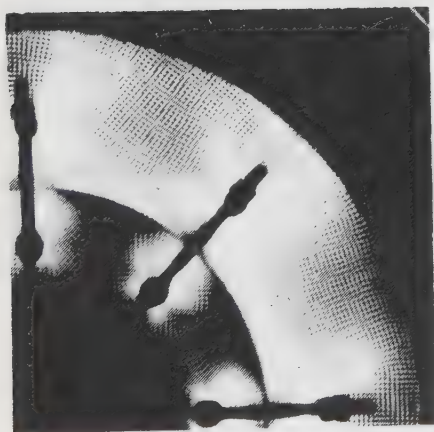
Die dunkel gebliebene Fläche des Transplantates ist geringer, die halbmondförmigen dunklen Stellen zwischen zwei Einstichen und dem Transplantatrand sind größer geworden.



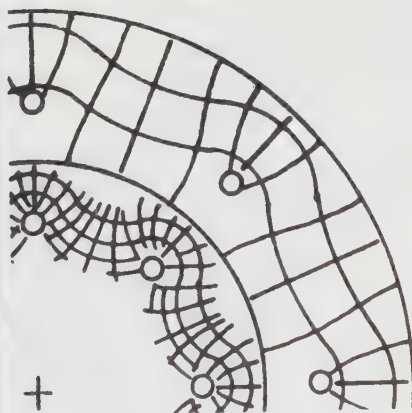
a



b



c



d

Abb. 13 : Modell B mit 8 Einzelknüpfnähten;
Abstand 1,5 cm

- a) Trajektorienphotogramm
- b) graphische Darstellung
- c) Ausschnitt aus Trajektorienphotogramm
- d) graphische Darstellung

3.) Modell C : (Abb. 14 a - d)

Dieses Modell imitiert eine ungleichschenkelig fortlaufende Naht mit acht Einstichen; der Abstand der Einstiche zum Schnitttrand beträgt 1,5 cm.

a) Spannungsverhältnisse in der Wirtskornea :

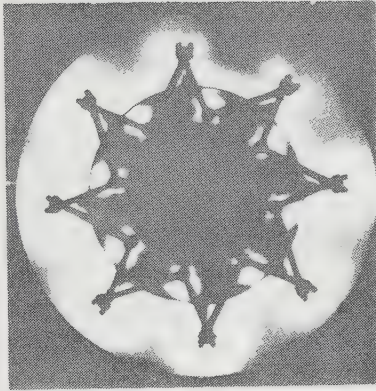
Die Wirtskornea zeigt oberflächlich betrachtet im Prinzip das gleiche Bild wie wir es bei Modell A und B gesehen haben. Betrachtet man jedoch besonders die Abbildungen 14 b und d sorgfältiger, so stellt man fest, daß die Spannungslinien asymmetrisch geworden sind. Die in Abbildung 14 d mit "a" bezeichneten Zugspannungslinien zeigen am deutlichsten die entstandene Asymmetrie.

Denkt man sich diese Linien über ihren gezeichneten Verlauf hinaus verlängert, so laufen sie alle in einigem Abstand an der Modellmitte "M" vorbei, im Gegensatz zu den identischen Linien in den beiden vorhergehenden Modellen, die sich alle genau in der Modellmitte schneiden. Entsprechend asymmetrisch verlaufen auch die ansonsten gleichen Druckspannungslinien rundum in der Wirtskornea.

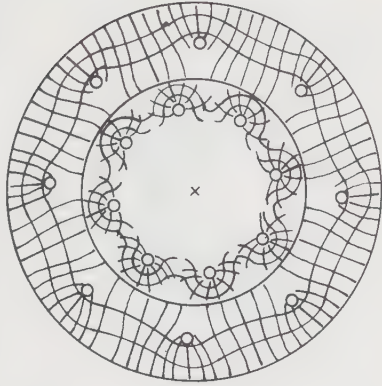
Es ist dies auch das erste Modell, bei dem die Wirtskornea nicht völlig gleichmäßig aufgehellte ist; jeweils zwischen zwei benachbarten Einstichen sehen wir deutlich dunklere Bezirke.

b) Spannungsverhältnisse in dem Transplantat :

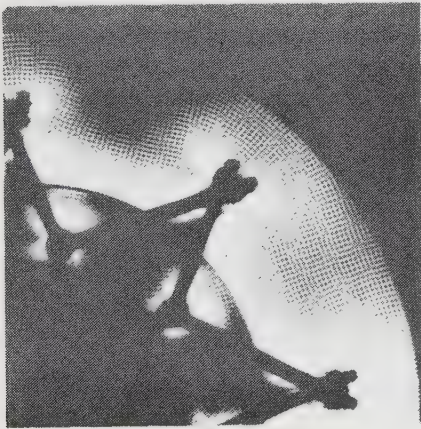
Das Transplantat zeigt die gleichen Spannungsverhältnisse wie das Transplantat des vorausgegangenen Modelles. (Vergl. Abb. 13 b und 14 b). Aber auch hier ist die gleiche Asymmetrie festzustellen. Die Abbildungen 14 a und c zeigen außerdem, daß die dunklen Flächen zwischen den Einstichstellen sich mit dem dunkel verbliebenen Zentrum vereinigt haben und kaum noch durchgehende Spannungslinien bogenförmig, wie zum Beispiel in den Abbildungen 12 a - d zu sehen, von Einstich zu Einstich verlaufen.



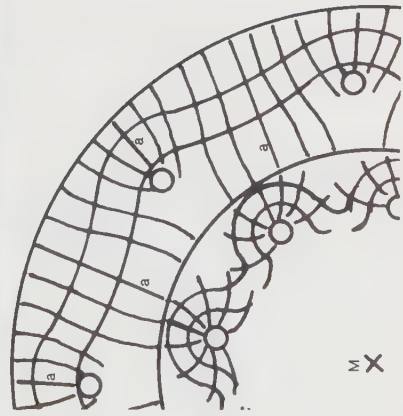
a



b



c



d

Abb. 14 : Modell C mit ungleichschenkelig fortlaufender Naht, 8 Einstiche; Abstand 1,5 cm

- a) Trajektorienphotogramm
- b) graphische Darstellung
- c) Ausschnitt aus Trajektorienphotogramm
- d) graphische Darstellung

4.) Modell D : (Abb. 15 a - d)

Das Modell D zeigt acht Einstiche mit gleichschenkelig fortlaufender Naht; der Abstand von Einstich zu Schnitttrand beträgt 1 cm.

a) Spannungsverhältnisse in der Wirtskornea :

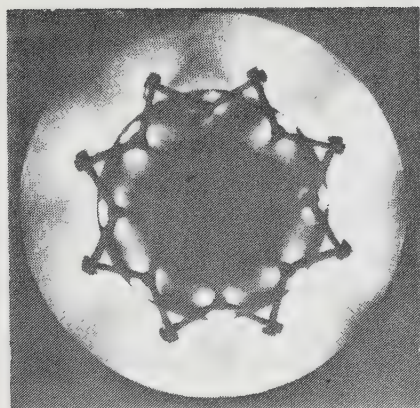
Den Spannungsverhältnissen in der Wirtskornea dieses Modelles ist nichts Neues hinzuzufügen, sie gleichen denen der bisher besprochenen Modelle.

b) Spannungsverhältnisse in dem Transplantat :

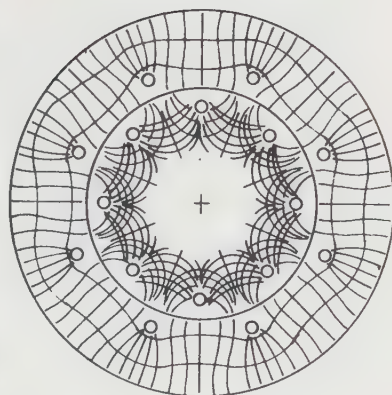
Die Spannungen im Transplantat ähneln sehr denen im Transplantat des Modelles A.

Die Zugspannungen verlaufen ohne Unterbrechung sichelförmig von Einstich zu Einstich. Die Druckspannungslinien verlaufen zwischen Einstichstelle und Zentrum jeweils um eine Einstichstelle herum.

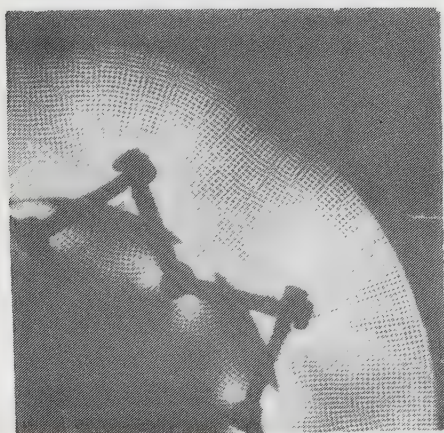
Auf den Abbildungen 15 a und c erkennt man auch wieder die zwischen zwei Einstichen und dem Schnitttrand gelegenen dunklen Flächen.



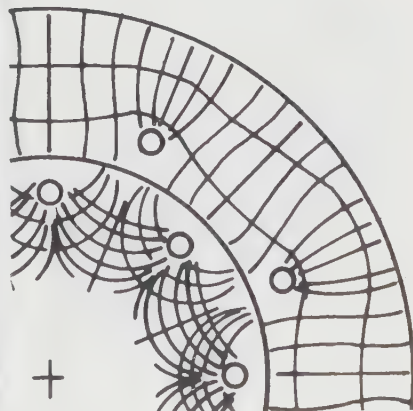
a



b



c



d

Abb. 15 : Modell D mit gleichschenkelig fortlaufender Naht, 8 Einstiche; Abstand 1 cm

a) Trajektorienphotogramm

b) graphische Darstellung

c) Ausschnitt aus Trajektorienphotogramm

d) graphische Darstellung

5.) Modell E : (Abb. 16 a - d)

Das letzte der untersuchten Modelle hat zwölf Einstiche und eine gleichschenkelig fortlaufende Naht; der Abstand von Einstich zu Schnittrand beträgt 1 cm.

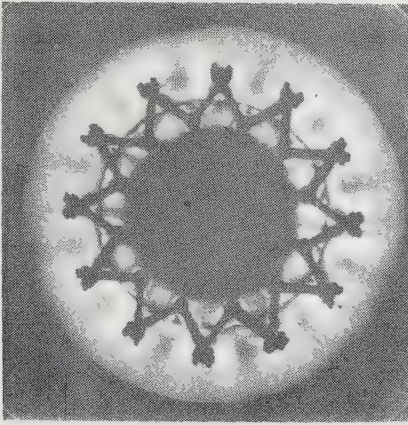
a) Spannungsverhältnisse in der Wirtskornea :

Auch bei diesem Modell zeigt die Wirtskornea einen prinzipiell gleichen Spannungsverlauf. Hinzu kommt hier jedoch noch, daß zwischen zwei nebeneinanderliegenden Einstichen bogenförmige Druckspannungslinien laufen, die nach innen zum Schnittrand hin bis zu einem geradlinigen Verlauf abflachen und als Tangente am Schnittrand entlang verlaufen.

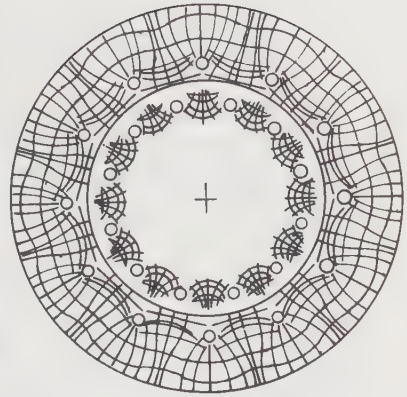
b) Spannungsverhältnisse in dem Transplantat :

Auf den ersten Blick fällt auf, daß der dunkle Anteil des Transplantates bei diesem Modell flächenmäßig am größten ist. Druck- und Zugspannungen gehen kaum über die Tiefe der Einstiche in Richtung Zentrum hinaus.

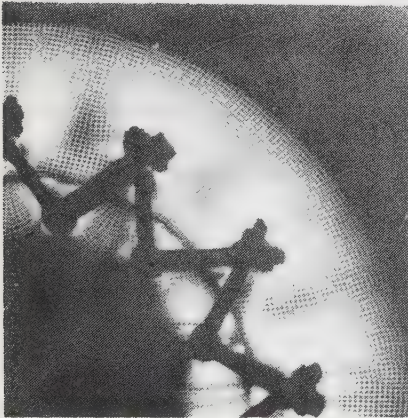
Dunkle Flächen zwischen den Einstichen und dem Schnittrand sind hier nicht zu finden. Der Raum zwischen zwei benachbarten Einstichen und dem Schnittrand ist ausgefüllt mit in Richtung Zentrum strahlenförmig auseinanderstrebender Druckspannungen und von Einstich zu Einstich verlaufender Zugspannungslinien.



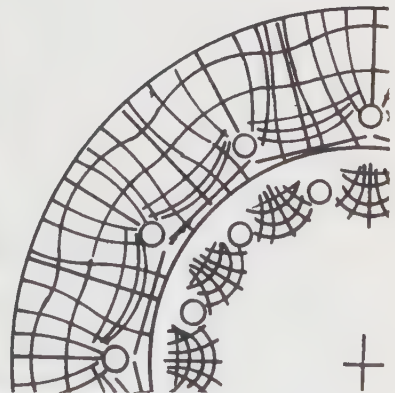
a



b



c



d

Abb. 16 : Modell E mit gleichschenkelig fortlaufender Naht, 12 Einstiche; Abstand 1 cm

- a) Trajektorienphotogramm
- b) graphische Darstellung
- c) Ausschnitt aus Trajektorienphotogramm
- d) graphische Darstellung

VII. Diskussion der Ergebnisse

1. Die Spannungsverhältnisse in der Wirtskornea :

Bei der Beschreibung der Spannungslinien in der Wirtskornea im letzten Kapitel wurde bereits festgestellt, daß stets die Wirtskornea, also die Randzone unseres Modells, stärker aufgehellte ist als die Mitte, die dem Transplantat entspricht.

Der Grund für diese starke Aufhellung liegt darin, daß die Wirtskornea unter erheblicher Spannung steht. Dieser Befund ist unabhängig von der Nahtmethode und der Anzahl der Nähte, wie der Vergleich der Abbildungen 12 a bis 16 a zeigt.

Bei allen Modellen ist auch ersichtlich, daß die Wirtskornea nicht an allen Stellen gleich intensiv aufgehellte ist. Die hellsten Stellen sind die Orte stärkster Belastung, sie liegen immer in der Nähe eines Einstiches, und zwar sie jeweils links und rechts strahlenförmig zum Kornearand ziehend ("a" in Abb. 12 d und Abb. 17). Deutlich erkennt man bei vergleichender Betrachtung der Abbildungen 12 c und d in der Abb. 12 c die in Abb. 12 d mit "a" bezeichneten Trajektorien.

Die Stellen direkt hinter einem Einstich, d. h. zwischen Einstich und Modellrand sind grundsätzlich weniger stark aufgehellte.

Aus diesen Beobachtungen läßt sich folgern, daß die Hauptbelastung nicht in Fortsetzung der Richtung der tatsächlich auf die Bolzen ausgeübten Belastung geradlinig von Einstichstelle zum Modellrand verläuft ("c" in Abb. 12 d und Abb. 17 a). Vielmehr verteilt sich die auf den Bolzen mit Zugrichtung zur Modellmitte hin ausgeübte Belastung fächerförmig auf die Umgebung der Einstichstelle (Abb. 17 a und c).

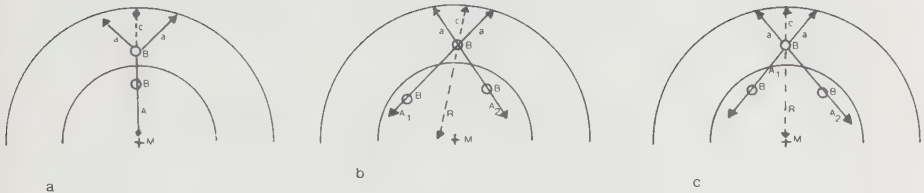


Abb. 17 a - c : Graphische Darstellung der Hauptbelastungsrichtungen in der Wirtskornea

- 17 a : beim Modell mit Einzelknüpfnähten
- 17 b : beim Modell mit ungleichschenklig fortlaufender Naht
- 17 c : beim Modell mit gleichschenklig fortlaufender Naht

A, A₁, A₂ = Zugrichtungen

B = Bolzen in der Einstichstelle

R = Resultierende aus den Zugrichtungen A₁ + A₂

a = tatsächliche Hauptspannungsrichtung = Orte größter Belastung

c = erwartete Hauptspannungsrichtung

Diese Feststellung trifft auf alle Modelle in gleicher Weise zu, unabhängig davon, wie die Naht angelegt ist.

Lediglich das Modell C (Abb. 17 b) mit seiner ungleichschenklig fortlaufenden Naht macht hierin eine Ausnahme :

Bei diesem Modell tritt die erwartete und im letzten Kapitel beschriebene Asymmetrie ein. Der aus dem von den Zugrichtungen A₁ und A₂ im Kräfteparallelogramm resultierende

Vektor R schneidet nicht den Mittelpunkt des Modelles; mit entsprechender Neigung verlaufen dann auch die Hauptspannungsrichtungen "a".

Die Zwischenräume zwischen den Einstichen in der Wirtskornea sind bei allen Modellen dunkler, was die Schlußfolgerung erlaubt, daß diese Flächen weniger starker Belastung ausgesetzt sind.

Das Modell E (Abb. 16 a) mit eng gelegter Naht zeigt, daß der engeren Zwischenräume wegen diese dunklen Flächen auch wesentlich kleiner sind. Die Belastung der Wirtskornea, ausgedrückt in Druck oder Zug pro Fläche, ist geringer als bei den Modellen mit weniger Nähten. Im Modell E verteilt sich die Belastung gleichmäßiger auf die gesamte Korneafläche.

2. Die Spannungsverhältnisse in den Transplantaten :

Zeigte die Wirtskornea bei allen Modellen grundsätzlich gleiches Aussehen, so änderte sich das Bild der Transplantate von Modell zu Modell.

Ein bemerkenswertes Ergebnis der Versuche besteht zunächst darin, daß die Spannungen nicht, wie zu erwarten gewesen wäre, quer durch das Transplantat laufen, was durch die bei allen Modellen dunkel gebliebenen Zentren bewiesen ist. Vielmehr verbleiben die Spannungen auf den Rand des Transplantates und den Bereich der Einstichstellen beschränkt.

Wie sind nun die dunklen Zentren und die dunklen Flächen zwischen zwei Nähten und dem Transplantatrand zu deuten ?

Entsprechend dem Prinzip des spannungsoptischen Modellversuches sind dunkle Flächen Stellen, an denen keine Belastung auf den elastischen Körper einwirkt und seine optischen Eigenschaften nicht verändert werden. Daraus folgt,

daß das Transplantat im überwiegenden Anteil seiner Schnittfläche und in seinem Zentrum nicht unter einer Belastung steht.

Die sichelförmigen dunklen, d. h. spannungsfreien Stellen zwischen zwei Nähten und dem Transplantatrand sind bei den Modellen mit acht Einstichen (Modelle A bis D) etwa gleich groß.

Bei dem Modell mit zwölf Einstichen sind sie auf einen Bruchteil der Größe der ersten Modelle geschrumpft.

Bei den Modellen A - D sind etwa $\frac{2}{3}$ des Gesamtumfanges des Schnitttrandes dunkel, d. h. spannungsfrei.

Geht man davon aus, daß ein unter Spannung stehendes Material oder Gewebe bei jeder Spannungsänderung "arbeitet" und in sich eine Verschiebung erfährt, so dürfte die im vorangegangenen Absatz aufgezeigte Tatsache unter dem klinischen Aspekt interessant werden.

Das Modell E mit der engen Naht zeigt gegenüber den anderen vier Modellen einen Vorteil auf, was die Größe des spannungsfreien Zentrums betrifft.

Das unter dem augenoptischen Gesichtspunkt und für das Sehen des Patienten so wichtige Zentrum des Transplantates ist bei Modell E am größten.

Wie im Kapitel VI. beschrieben, gehen bei diesem Modell die Druck- und Zugspannungen nicht über die Tiefe der Einstiche hinaus (1 cm vom Schnitttrand).

Vergleicht man Modell D (Abb. 15 a) mit Modell E (Abb. 16 a) - bei beiden Modellen beträgt der Abstand von Einstich zum Schnitttrand 1 cm - so sieht man deutlich, wie bei Abbildung 15 a die Spannungen weit über diesen Radius von einem Zentimeter in das Zentrum hinausgehen, während in

Abbildung 16 a dies nicht der Fall ist.

Bei den Modellen B und C (Abb. 13 a und 14 a) greifen die Spannungen ebenfalls nicht über die Einstiche in Richtung Zentrum hinaus; - sie verlagern sich in den Raum hinter den Einstich in Richtung Transplantatrand. Jedoch beträgt bei diesen Modellen der Abstand von Einstich zum Schnitttrand 1,5 cm, das Zentrum ist also von vorneherein durch diesen größeren Abstand kleiner geworden, so daß die Tatsache, daß Spannungen im Bereich der Einstiche und dahinter verbleiben, nicht mehr von Vorteil ist.

Die Untersuchung und der Vergleich der fünf Nahttechniken läßt also den Schluß zu, daß das spannungsfreie Zentrum eines Transplantates umso größer ist, je enger die Naht gelegt wird.

Es bleibt festzuhalten, daß, was sowohl die Verhältnisse in der Wirtskornea als auch im Transplantat angeht, das Modell E am vorteilhaftesten erscheint. Demgegenüber steht die Tatsache, daß die anderen Modelle eine weitgehend spannungsfreie Adaptionsfläche mit der Wirtskornea bilden.

Abschließend lassen sich die Fragen, die Anregung zu unseren Untersuchungen waren, hierzu wie folgt beantworten :

Die zunächst angesprochene Vermutung, daß direkte Nähte, mit denen ein Hornhauttransplantat in seiner Wirtskornea fixiert wird, in beiden Gewebeanteilen Spannungen entstehen lassen, ist durch die Versuche bewiesen worden.

Folgende Aussagen lassen sich hinsichtlich des Spannungsverlaufes bei den fünf untersuchten Nahttechniken machen :

Auffallend ist, daß unabhängig von der Nahtmethode die Wirtskornea stärkerer Belastung ausgesetzt ist als das Transplantat. Es ist zu beobachten, daß alle Modelle mit acht Einstichen, seien sie mit Einzelknüpfnähten oder mit fortlaufender Naht versehen, in ihrem Spannungsbild grundsätzlich nicht voneinander abweichen. Bei diesen Modellen ist der spannungsfreie Anteil des Transplantates nahezu

gleich groß, auch die Spannungsverläufe in der Wirtskornea bieten ein fast einheitliches Bild.

Das Modell E mit zwölf Einstichen weicht hiervon insofern ab, als daß die spannungsfreie Mitte des Transplantates größer ist als bei den Modellen A bis D. Wird die Naht enger gelegt, wie dies in Modell E geschehen ist, so weicht das aus diesem Modell resultierende Bild des Spannungsverlaufes insofern von den anderen Modellen ab, als die spannungsfreie Mitte des Transplantates größer geworden ist. Weiterhin beobachtet man eine gleichmäßigere Verteilung der Spannungen in der Wirtskornea bei Modell E.

VIII. Zusammenfassung

Bei der Durchführung einer Keratoplastik sind viele Faktoren zu beachten, um ein klares Einheilen des Transplantates zu erzielen.

Wahrscheinlich sind hierfür neben anderen Problemen auch die durch die Nähte bedingten Spannungsverhältnisse sowohl in der Wirtskornea als auch im Transplantat von Bedeutung.

Um dieser Frage nachzugehen, wurden im spannungsoptischen Versuch verschiedene Nahttechniken an Hand von Plexiglasmodellen untersucht.

An Nahtmethoden zur Transplantatfixation wurden verwendet : acht Einzelknüpfnähte mit verschiedenem Abstand zwischen Einstichstellen und Schnittrand, fortlaufend ungleichschenklige und gleichschenklige Naht mit acht und zwölf Einstichen.

Die erzielten Spannungsverhältnisse wurden photographisch dargestellt und folgende Schlüsse gezogen :

1. Bei allen durchgeführten Nahtmethoden steht die Wirtskornea unter erheblich stärkerer Belastung als das Transplantat. Bei fortlaufender Naht ändert sich mit zunehmend enger gelegter Naht das Verhältnis dahingehend, daß bei dem Modell mit zwölf Einstichen die Wirtskornea gleichmäßiger belastet ist als bei den Modellen mit acht Einstichen.
2. Spannungen ziehen nicht quer durch das Transplantat, sondern sind auf den Rand beschränkt. Es bleibt ein spannungsfreies Zentrum, das bei Modell E mit zwölf Einstichen am größten ist.
3. Die Modelle A bis D haben einen überwiegend spannungsfreien Schnittrand, was für diesen Rand in seiner Eigenschaft als Adaptionsfläche mit der Wirtskornea wichtig sein dürfte.
4. Der Abstand zwischen Einstichstelle und Transplantatrand hat auf den Spannungsverlauf nur insoweit einen Einfluß,

als sich bei weitem Abstand das Spannungsgeschehen vom Raum zwischen Einstich und Zentrum in den Raum zwischen Einstich und Schnitttrand verlagert.

5. Bei ungleichschenkelig angelegter Naht wird das Trajektorienbild entsprechend den ungleichen Nahtschenkeln asymmetrisch. Diese Asymmetrie ändert jedoch nichts am bei allen Modellen grundsätzlich gleichen Spannungsverlauf; daher bringt diese Nahtmethode keinen Vorteil.

Unter Abwägung aller Untersuchungsergebnisse erweist sich das Modell E als das Modell mit klinisch wichtigen Vorteilen, nämlich einer gleichmäßig angespannten Wirtskornea und einem großen spannungsfreien Transplantatzentrum.

IX. Literaturverzeichnis

- Barraquer, J., Rutlan, J. : Die Chirurgie des vorderen Augenabschnittes,
Bd. II, Ferdinand-Enke-Verlag, Stuttgart, 1971
- Castroviejo, R. : Atlas of Keratectomy and Keratoplasty,
W. B. Saunders Company, Philadelphia-London, 1966
- Dieffenbach, J. F. : Beiträge zur Verpflanzung der Hornhaut,
v. Ammons Z. Ophthalmol., Bd. 1, 172, 1831
- Elschnig, A. : Demonstration zur durchgreifenden Keratoplastik,
Ber. Heidelberger Ophthalm. Ges., 331, 1898
- Filatow, V. P. : Zur Technik der totalen durchgreifenden Keratoplastik,
Klin. Mbl. Augenhk., Bd. 72, 423, 1924
- Franceschetti, A. : Das Schicksal der Hornhauttransplantate,
Klin. Mbl. Augenhk., Bd. 104, 333, 1940
- Friede, R. : Zur Klinik der durchgreifenden optischen Keratoplastik,
Klin. Mbl. Augenhk., Bd. 101, 1, 1938
- Gärtner, J. : Photoelastische Untersuchungen zur Glaskörperstruktur, I. Versuche mit ebener Spannungsoptik,
Albrecht v. Graefes Arch. Ophthalm., Bd. 176, 195, 1968
- Hallermann, W. : Über einige postoperative Komplikationen bei Keratoplastik,
Klin. Mbl. Augenhk., Bd. 143, 167, 1963
- Hippel, A. von : - Über die operative Behandlung totaler stationärer Hornhauttrübungen,
Arch. Ophthalm., Bd. 23, 79, 1877
Über Transplantationen der Cornea,
Arch. Ophthalm., Bd. 24, 235, 1878

- Hochgesand, P. und Gärtner, J. : Photoelastische Untersuchungen zur Glaskörperstruktur, II. Versuche mit ebener und räumlicher Spannungsoptik,
Albrecht v. Graefes Arch. Ophthal., Bd. 181, 36, 1970
- Hruby, K. : Zur Sicherung durchgreifender Hornhauttransplantate,
Klin. Mbl. Augenhk., Bd. 147, 161, 1965
- Kummer, B. : Bauprinzipien des Säugetierskelettes,
Thieme-Verlag, Stuttgart, 1959
- Kutschera, E. : Experimenteller Beitrag zur postoperativen Reißfestigkeit von Hornhauttransplantaten,
Klin. Mbl. Augenhk., Bd. 155, 33, 1969
- Löhlein, W. : Eine erfolgreiche Methode der Hornhauttransplantation,
Arch. Augenhk., Bd. 67, 398, 1910
- Magitot, A. : Présentation d'un cas de kératoplastik opéré depuis 6 mois (Procédé de transposition autoplastique),
Bull. Soc. Ophthalm. France, Bd. 26, 81, 1913
- Pauwels, F. : Bauprinzipien des Bewegungsapparates und Beanspruchung der Röhrenknochen,
Acta anat., 12, 207, 1951
- Pellier de QUENGSY, G. : Précis au cours d'Opérations sur la Chirurgie des Yeux, Paris, 1789
- Power, H. : On transplantation of the cornea,
Rep. Internat. Ophthalm., Congr. 1872, Bd. 4, 172, London, 1873
- Reisinger, F. : Die Keratoplastik, ein Versuch zur Erweiterung der Augenheilkunde,
Bayer. Annalen, Bd. 1, 207, 1824
- Schlüter, K. : Form und Struktur des normalen und des pathologischen veränderten Wirbels, Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis,
Bd. 30, Hippokrates-Verlag, Stuttgart, 1965

Thiel, R. : - Ophthalmologische Operationslehre,
Lieferung 1 und 2, Georg-Thieme-Verlag, Leipzig,
1942/43

- Fortschritte und Probleme auf dem Gebiet
der Überpflanzung menschlicher Hornhaut,
Zbl. ges. Ophthalm., Bd. 48, 211, 1943

Thomas, J. W. T. : - The technique of corneal
transplantations as applied in a series of cases,
Transact. Ophthalm. Soc. Unit. Kingdom, Bd. 55,
373, 1935

- Keratoplasty : Some technical
considerations,
Transact. Ophthalm. Soc. Unit. Kingdom, Bd. 70,
16, 1951

Zirm, E. : Eine erfolgreiche totale Keratoplastik,
Graefes Arch. Ophthal. Bd. 64, 580, 1906

Danksagungen

Herrn Professor Dr. Nover danke ich für die Überlassung des Themas und für die großzügige finanzielle Unterstützung durch seine Klinik.

Herrn Dr. Hochgesand sei Dank für die unmittelbare Betreuung meiner Arbeit, - ebenso Herrn Diplom-Optiker Schollmeyer für seine Unterstützung bei den photographischen Arbeiten.

Herrn Professor Dr.-Ing. Stöferle und seinem Assistenten, Herrn Diplom-Ingenieur Theimert, vom Lehrstuhl und Laboratorium für Technologie und Werkzeugmaschinen der Technischen Hochschule Darmstadt und deren Werkstattdleiter, Herrn Geißler, danke ich für die Herstellung der Modelle sowie der Firma Röhm & Haas in Darmstadt für die kostenlose Überlassung des Modellmaterials.

Lebenslauf

Am 25. Dezember 1944 kam ich als viertes Kind des Oberregierungsrates Ernst-Martin Schmitt und seiner Ehefrau Mathilde geb. Heller in Lauterbach/Oberhessen zur Welt.

Von 1951 bis 1955 besuchte ich die Volksschule in Westhofen bei Worms und in Wiesbaden.

An der Oranienschule in Wiesbaden, Realgymnasium für Jungen, bestand ich 1955 die Aufnahmeprüfung. Nach 10-jährigem Besuch dieser Schule legte ich dort 1965 mein Abitur ab.

Nach Ableistung meiner Wehrpflicht und Entlassung als Reserveoffizier begann ich zum Wintersemester 1966/67 an der Universität Mainz das Medizinstudium. Das Vorphysikum bestand ich 1967, das Physikum im Herbst 1969.

Im Sommersemester 1970 und Wintersemester 1970/71 studierte ich an der Universität Kiel. Wieder nach Mainz zurückgekehrt, absolvierte ich hier die restlichen drei klinischen Semester. Im Sommer 1971 begann ich mit der vorgelegten Dissertation.

Am 27. Oktober 1972 heiratete ich die Volksschullehrerin Karla Maria Mohr.

Nach erfolgreichem Abschluß des Medizinischen Staatsexamens am 7. Dezember 1972 trat ich am 18. Dezember 1972 zur Ableistung der Medizinalassistentenzeit meine erste Stelle am Halberg-Krankenhaus in Brebach-Fechingen/Saarbrücken an.

